第 39 卷 第 4 期
2021 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 4
Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.01

行星形成理论模型及行星分类

蒋效铭[1]，朱宗宏[1]，HE Ruogu[2]

(1. 武汉大学 物理科学与技术学院，武汉 430072； 2. McGill University Department of Atmospheric and Oceanic Sciences，Canada Montreal Quebec H3A 0B9)

摘要： 分类法是天文学中常用的方法，已经广泛应用于恒星、星系等领域的研究中，但目前在行星领域尚无一个完善的分类体系。回顾了行星形成理论模型的构建历程及其不足；总结了系外行星的搜寻结果及其参数分布特点；介绍了目前在行星分类方面的研究背景、进展与局限；为涵盖更多的系外行星族群，提出结合对原行星盘的射电观测，扩充理论研究及分类框架构建的样本；最后介绍了最新一代及规划中的大型观测设备在系外行星方面的观测能力与科学目标。

关 键 词： 行星理论；系外行星；分类法

中图分类号： P185 **文献标识码：** A

1 引 言

太阳系是我们身居的行星系统，在天文学尺度上，地球与太阳系内其他行星的距离微不足道，与天文学的其他研究对象相比，我们在对行星样本观测方面有得天独厚的优势：距离近从而可以发射探测器，直接去行星上进行高分辨率、高信噪比的观测，如卡西尼和新视野号探测器、勇气和好奇号火星车；还可以直接获取样本，发射着陆器取样并返回地球实验室，如美国的阿波罗计划、日本的隼鸟探测器、中国的嫦娥工程及行星探测工程。我们不仅能观测，还能获取第一手材料，这些优势是天文学其他领域难以企及的。这些优势决定了太阳系是行星科学研究的第一样本，前人在对太阳系的观测、理解的基础上构建起了行星起源及演化模型，如漩涡模型、星云假说、Chamberlin-Moulton 星子假说、引力不稳定性模型、核吸积模型等。

然而行星也是一类我们非常不熟悉的天体，行星的质量决定了其难以进行高能辐射过程，不能产生足够强的信号，远距离的观测者难以感知行星的存在。太阳系外主序恒星周围

收稿日期： 2021-02-01； **修回日期：** 2021-07-02

资助项目： 国家自然科学基金 (11633001，11920101003，12021003)；中国科学院战略性先导科技专项 (XD-B23000000)

通讯作者： 朱宗宏，zzh@whu.edu.cn

的行星也是到了 1995 年才由 Mayor 和 Queloz[1] 完成第一次认证，这也开启了大样本研究行星的时代，后续的地基巡天及 Kepler 之类的空间望远镜发现了大量的系外行星，在 25 年内将行星的样本从 8 颗扩大到了 4 000 多颗，打开了全新的世界。系外行星的观测也颠覆人类长久以来的认知，严重挑战着现有的行星形成理论。

2 行星形成理论发展

2.1 古代和近代理论模型

2.1.1 漩涡模型

最早的太阳系形成模型于牛顿万有引力定律之前提出，法国哲学家、数学家勒内・笛卡尔 (René Descartes) 在 1632−1633 年间撰写的《世界》中提出了漩涡模型。模型认为宇宙中充满了由粒子构成的漩涡，太阳和行星从一个巨大的漩涡中凝结而出，且漩涡通过某种机制收缩，从而解释行星的圆周运动[2]。

2.1.2 星云假说

在漩涡模型之后，又产生了星云假说。星云假说最早在 1743 年由瑞典科学家、哲学家、神学家伊曼纽・斯威登堡 (Emanuel Swedenborg) 提出[3]，后由德国哲学家，启蒙运动的核心思想家伊曼纽尔・康德 (Immanuel Kant) 于 1755 年阐述并进行拓展[4]。康德认为，太阳系始于一团分散的粒子云，粒子的引力导致粒子间相互运动和碰撞，而后化学力使他们结合在一起。随着这些粒子团中的部分比其他粒子团更大，生长速度更快，最终形成行星。康德的理论在观测上存在明显的缺陷，不能解释行星沿相同方向和平面绕太阳运动，也没有考虑行星卫星的绕转。

到了 1796 年，皮埃尔-西蒙・拉普拉斯 (Pierre-Simon Laplace) 对星云假说进行了改进[4]，他认为行星形成于太阳形成之后，太阳的大气延伸到最远的行星轨道之外，而太阳随着辐射热量而逐步冷却，所能提供的气体压力随之下降，太阳开始收缩。根据角动量守恒定律，太阳变小将导致太阳转速变快，离心力导致物质向外漂移，而引力将物质向内拉扯，共同作用下形成多个同心圆环。后续演化中每个环中的物质聚集形成一颗行星。拉普拉斯也用相同的理论模型来解释行星卫星的形成，认为行星环最终将演化成行星的卫星。拉普拉斯的模型可以合理地解释太阳系行星在同一平面上以同一方向绕太阳公转。将康德和拉普拉斯的理论相结合，就是康德-拉普拉斯行星假说。该假说被广泛接受了近一个世纪，而后续发现了高偏心率轨道的小行星和系外行星，以及有逆行轨道的卫星，这些观测事实都挑战着这一理论。此外，太阳占太阳系总质量的 99.9%，而行星却拥有系统中 99% 以上的角动量，若太阳系符合这一理论，要么太阳应该转得更快，要么行星公转更慢。

2.1.3 Chamberlin-Moulton 星子假说

到了 1905 年，美国地质学家 Thomas Chrowder Chamberlin 和天文学家 Forest Ray Moulton 提出了独立于上述假说的全新理论——Chamberlin-Moulton 星子假说[5]。假说认为在太阳的早期有一颗恒星以极近的距离与太阳相遇，潮汐力在太阳表面产生凸起，其与

太阳的内部机制共同作用，将物质多次从太阳抽出。由于相遇恒星的引力作用，太阳会生出两个螺旋状的旋臂，尽管大部分物质将会落回太阳，但是仍会有部分留在轨道上。轨道上的这部分物质将会冷凝成为大量小行星以及少量大的原行星，即星子。这些星子通过碰撞，形成行星和卫星，剩下的星子则为后世所观测到的彗星和小行星。当时天文观测到的“螺旋星云”则被当成这一假说的观测证据，螺旋结构从中央亮区延伸出来。后来人们知道了所谓的“螺旋星云”实际上是旋涡星系，而非演化中的恒星。

到了 1917 年，Jeans[6] 称，仅需恒星以非常近的距离与太阳擦肩而过就能射出物质，并不需要太阳产生凸起。但是 Chamberlin-Moulton 星子假说仍然存在一些致命的缺陷。1935 年 Henry Norris Russell 指出，该假说难以解释太阳系内的轨道角动量分布，因为潮汐撕裂物质的速率分布应该主要集中在低速区域，只有少部分能达到高速，对应的物质应该主要分布在靠近太阳的轨道，然而实际观测中，太阳系绝大部分轨道角动量都分布在远离太阳的区域[7]。1939 年，Lyman Spitzer 研究发现从太阳中抽出的物质会消散而不会凝结成行星[8]。并且，若将此理论应用于银河系，会发现这样的事件发生率极低，因为两颗恒星很难以如此近的距离相遇[9]。此外，随着对星际介质理解的增进，发现确实有大量云状物质存在，而且恒星就在其中形成，行星也必将在恒星形成时期，以某种机制生成，因此更支持其他理论模型。

现今行星形成理论已经抛弃 Chamberlin-Moulton 星子假说，但仍保留了小行星这一概念。目前学界将太阳系的起源视为恒星形成的一个案例，随着观测的增加，逐步限制形成机制，在康德-拉普拉斯假说的启发下，衍生出的主要模型有引力不稳定性模型和核吸积模型。

2.2 现代理论模型

2.2.1 引力不稳定性模型

引力不稳定性模型由 Kuiper 在 1951 年提出[10]。模型认为当原行星盘受扰动，发生引力坍缩撕裂形成多个团块，团块各自进一步坍缩形成行星。Cameron 在 1978 年进行的计算表明，原始太阳的吸积盘将会受扰动形成环，而环将自行坍缩形成气态巨行星[11]。在原行星盘中，会有温度和压强抵抗引力坍缩而保持稳定，原行星盘的稳定性可利用 Safronov-Toomre 准则判断[12, 13]：

$$Q \equiv \frac{c_{\rm s}\Omega}{\pi G\Sigma} \geqslant Q_{\rm crit} \approx 1 \quad ,$$

其中，Q 为 Toomre 参数，$c_{\rm s}$ 为声速 (单位为 $\rm cm \cdot s^{-1}$)，Ω 为轨道频率 (单位为 $\rm rad \cdot s^{-1}$)，G 为引力常数 (单位为 $\rm cm^3 \cdot g^{-1} \cdot s^{-2}$)，$\Sigma$ 为原行星盘表面密度 (单位为 $\rm g \cdot cm^{-2}$)。此准则是盘保持引力稳定的充分必要条件，当满足此准则时，盘将保持稳定不会撕裂，但不满足此准则时并不能说明盘将撕裂。

例如：对类太阳恒星的原行星盘距中心 r=10 AU 处取 $h/r = 0.05$，h 为盘在该处的厚度，则由 $h/r = c_{\rm s}/v_\phi$，v_ϕ 为轨道速度，得 $c_{\rm s} \approx 0.5\ \rm km \cdot s^{-1}$，为了使 $Q \leqslant 1$ 我们需要求 $\Sigma \geqslant 1500\ \rm g \cdot cm^{-2}$，远大于最小质量太阳星云 (MMSN) 中预期 10 AU 处的 $\Sigma \approx 54\ \rm g \cdot cm^{-2}$。

这表明引力不稳定性模型只能应用于非常致密的盘。对应的最易于坍缩的空间尺度为：

$$\lambda_{\rm crit} = \frac{2c_s^2}{G\Sigma} \quad .$$

可估算形成行星的质量：

$$M_{\rm p} \approx \Sigma\pi\lambda_{\rm crit}^2 \approx \frac{4\pi c_s^4}{G^2\Sigma} \approx 6M_{\rm J} \quad .$$

可见通过引力不稳定性模型将形成大质量的行星，且更适用于在远距离轨道。

2.2.2 核吸积模型

目前最主流的观点为核吸积模型，最早由 Safronov (1969 年)[14]，Goldreich 和 Ward (1973 年)[15] 等人构建。核吸积模型也认为太阳系起源于原始星云的引力坍缩，而坍缩可能是由云中随机的密度波动触发，也可能是受外界扰动所引起，如超新星爆发的冲击波。云团迅速坍缩为球状，因其绕银河中心公转，近心侧比远心侧的速度慢，随着坍缩的发展，云团开始旋转，由角动量守恒，在云团中心引力和旋转离心力的共同作用下，云团将演变为盘状，即形成原行星盘。当气体和尘埃向中心吸积时，引力势能转化为动能并使中心区域压强和温度升高，当达到一定阈值后，开始热核反应，即标志着太阳的形成。同时，原行星盘中相邻的物质以相近的轨道运行，尘埃互相之间有机会发生轻柔的碰撞，然后粘附凝结在一起，最后形成更大的固体星子。固体星子作为吸积核持续吸积周围的物质增大自身质量和引力，拥有更大的质量后，更强的引力可以扩大吸积的范围，正向促进吸积过程，直到清空其 Hill 半径内的物质，此过程即为核吸积模型最核心的思想。

在核吸积模型的基础上，后续研究对一些观测到的现象做出了解释，而观测现象也为核吸积模型做出了约束。太阳系的观测发现近距离轨道都是岩石行星，而气态巨行星都出现在远距离轨道上，这表明在太阳诞生后的演化阶段中，太阳辐射的光和热影响着原行星盘中的环境，核心区域温度高，产生光致蒸发效应，随着径向远离太阳，环境中的温度逐步下降，挥发性物质开始凝结。如在靠近太阳的区域，温度过高难以保留大量的如 H_2O, CO_2, NH_3 这样的挥发性物质，内轨道行星往往都是岩石行星，即：水星、金星、地球、火星。在外轨道的环境温度低，天体易于俘获更多的挥发性物质，当天体质量达到 10 $M_\oplus$ 后，其引力场足以束缚宇宙中最轻且最丰富的分子——H_2, He。首先从气态物质中凝结成固体的物质是硅酸盐，它们是形成岩石的基础材料，其次在更远的距离水冰形成。如：在内太阳系中的月球，密度为 3.3 $\rm g\cdot cm^{-3}$，主要成分是硅酸盐矿物组成的岩石；而在外太阳系中，土星的卫星特提斯 (Tethys)，密度约为 0.97 $\rm g\cdot cm^{-3}$，含有大量水冰。在更远处的卫星，密度小幅上升，包含了密度更高的固体，如 CO_2。因此在外轨道上可以形成质量非常大的行星，如木星、土星、天王星、海王星。因此太阳辐射带来的温度梯度效应，体现为随着距离增加，固体天体中挥发物比例逐步上升。

尽管康德-拉普拉斯的太阳系星云模型依然有一些问题，但是其核心思想与核吸积模型相符，得到了来自红外和射电观测的验证，发现恒星周围确实存在物质盘。且对星团的观测可以验证行星形成于很短的时标内，观测上发现，由于气体盘光学厚导致的恒星

近红外过量辐射的恒星数量比例从接近 100% (星团年龄 $\leqslant$1 Ma)，下降到 $\leqslant$5% (星团年龄 $\geqslant$10 Ma)[16, 17]，这表明从云团坍缩开始，到形成原行星盘只需要百万年。无论是吸积、光致蒸发，还是行星形成导致的近红外辐射下降，巨行星必须要在盘中气体耗散之前的几 Ma 内形成，同样的时标约束也适用于星子的形成，因为 80% ~ 90% 的岩石行星和冰巨星需要由星子凝结而成，星子必须在此时间内形成。

对于太阳系行星后续演化的理论研究表明，除了目前观测到的几大行星外，太阳系内还应该存在过几个月球或火星大小的天体。这些巨大的星子 (或称为行星胚胎)，与行星碰撞可以产生戏剧性的作用，从而解释观测上的一些反常现象。例如：在对月球起源的研究中，1986 年 Hartmann 等人[18]提出，类地原行星可能在形成的最后阶段遭受质量相当的天体的撞击，月球可能源于一次火星大小的天体与地球碰撞，碎裂物质重新聚合形成月球；在对水星的观测研究中发现水星的无压缩密度异常偏高，水星的密度为 5.43 $\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$，与地球的密度 5.52 $\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$相当，但若考虑在无压缩，即零压强的情况下，类地行星水星、金星、地球、火星的无压缩密度分别为 5.3, 4.4, 4.4, 3.8 $\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$，相比之下水星的密度异常偏高。Urey 意识到，水星必定有着比其他类地行星高的 Fe-Si 比[19]，这意味着水星的硅酸盐地幔通过某种机制丢失掉了一部分。Hartmann 关于月球起源的理论也可以用于解释水星偏高的密度[18]，根据此理论，1988 年 Benz 等人[20]计算表明，撞击前水星质量约为目前水星质量的 2.25 倍，后续与一颗质量约为 1/6 撞击前水星质量的天体高速碰撞，剥离了大部分的地幔，剩下一个由铁主导的固态核；观测上发现金星的自转速率极慢，自转周期长达 243 地球日，且自转方向与太阳系内其他行星相反，为解释这一异常现象，天文学家提出了内核-地幔摩擦与大气潮汐共同作用等解释[21−23]，也有更直观的观点——太阳系内曾经存在过的少量的大天体或大量的小天体与原始的金星发生过碰撞，大幅改变了金星的自转角动量[24]。

我们观测到的太阳系相当于行星系统演化过程中的时间切片，而观测到的各个系外行星系统很可能处于演化过程中的不同阶段，可以为我们拼凑出行星系统演化的整个过程，约束行星形成的理论模型。核吸积模型作为目前最主流的观点，也被应用于对系外行星的讨论，Mordasini 等人[25]在核吸积模型的框架下进行对行星族群的计算分析，发现行星系统初始条件的变化会导致最终形成多种多样的行星，由于观测选择效应的局限，目前所探测到的系外行星仅是所有行星的冰山一角，随着探测能力的提升，可以发现更多的行星族群[26]。在 Mordasini 等人的基础上，Emsenhuber 等人[27]近年又提出了新一代行星族群合成模型 (NGPPS)，该模型尽可能地预测了必要的行星观测量，包括半径、光度、蒸发率；扩大了模型适用的行星质量和行星公转轨道范围；发现对于类地行星，如果在初始阶段引入足够多的胚胎行星 (约 100 个) 将会产生一个猛烈撞击的阶段；对于巨行星，他们发现与木星质量相当的行星必须在原行星盘分布扩散前的很短时间内形成其固态内核，否则将会大幅迁移到原行星盘的内边界。

3 现有行星形成理论的疑难

3.1 理论矛盾

3.1.1 核吸积模型的谜团

尽管天文学界广泛接受核吸积模型，我们也已经清楚微米尺度尘埃长到厘米尺度粒子的过程，但在更大尺度的增长上依然存在谜团。数值模拟显示，当尘埃粒子增大至厘米级之后，它们与气体的耦合能力减弱，粒子的生长可能会停滞在厘米尺度。实验或数值模拟的结果表明，星体长到厘米尺度，其吸附粘合的有效性将大幅降低，平均碰撞速度也会增加，过大的粒子会以过快的速度碰撞，导致表面的化学过程无法发挥作用，甚至将颗粒撞碎，从而阻止其增长，因而被称为“反弹障碍”[28]。

星体在盘中径向迁移，但过快的迁移速度会使行星被宿主恒星吞噬。由于气压的存在，会使原行星盘中气体公转速度低于开普勒速度，亚开普勒速度的气体分子会从已形成的星体中夺取角动量，将星体拉向中央恒星。径向漂移的速度与行星的大小近似成正比，随着行星越来越大，其向内漂移的速度越来越快。数值模拟表明，米级尺度的星体有着最快的向内漂移速度，径向漂移会增加星体之间的相对速度，星体在较大的速度下相碰。由于星体的粘附性随着体积增大而减弱，可预期碰撞会导致许多星体破碎，此过程被称为“米级障碍”，阻止星体进一步长大。即使这些碎片重新聚集，也会反复上述过程并最终漂移到中央恒星，只留下气体，从而缺乏形成星子的关键固体[29]。

在原行星盘寿命方面，理论的要求与观测结果难以匹配。根据核吸积模型，木星内部固体核生长和吸积周围气体的过程，需要持续提供星云气体约 10 Ma。但是，观测表明年轻恒星周围原行星盘的寿命约为 0.110 Ma，而一半有行星盘的系统，其行星盘寿命也只有 3Ma[29]。

3.1.2 环形成理论的缺失

行星环的形成理论尚无定论，目前通常是用洛希极限来理解，当行星旁两个小天体彼此的吸引力小于行星对两天体的引力之差，两者就不能聚集在一起形成更大的天体。对于太阳系天体，木星、土星、天王星、海王星的环系统都处于洛希极限的范围之内。目前所面临的挑战是形成环的物质是在什么时候，通过什么机制到达洛希极限内，并最终到达现在的位置，以及对于不同的环系，如何限制环的半径范围。对于不同行星的环系，理论可能会天差地别，木星的环处于产生、湮灭的稳定态，新粒子可以由卫星的地质活动提供；而对于土星，仍有很多争论，1849 年，Edouard Roche 提出土星的环系统是由一颗轨道达到土星的洛希极限，从而被潮汐撕裂的卫星形成①。后续在潮汐撕裂理论的基础上，出现了新的变种理论，认为土星的卫星被一颗大彗星或小行星撞击后解体，形成土星环②。此外还有一种观点认为，土星环并非源于土星的卫星，而是由形成土星的原始星云的残留物质形成[30]。

---

①https://web.archive.org/web/20090321071339/http://www2.jpl.nasa.gov/saturn/back.html

②https://web.archive.org/web/20100323172559, http://science.nasa.gov/headlines/y2002/12feb_rings.htm

3.2 观测矛盾

伽利略探测器发现木星大气中富含挥发性物质，如 Ar 和 He，这类气体若要凝结并参与木星内核的形成，需要 30 K 甚至更低的温度，对应的轨道距离与传统认为木星的形成轨道相矛盾。不过后续的一些模型表明，原行星盘的中央平面温度比之前预估的低，可达到 25 K。

对于陨石的研究发现，最古老的一批陨石在化学上没有显著区别，除了挥发性元素外，几乎与太阳光球的成分相同。这些陨石也为研究原始颗粒的尺度提供线索，90% 的陨石体积内部充满颗粒结构，约为 0.1 mm 至厘米级尺度。研究表明，它们被加热至熔点之上持续了几分钟，但目前还不清楚这种加热的具体机制，有研究者提出是由于星云激波，但激波的起源也存在争议[31]。

20 世纪 90 年代以来，发现了大量的系外行星，系外行星中大量的例子严重挑战着上述行星理论。在系外行星中，存在着大量非常靠近宿主恒星的巨行星，称作热木星。热木星的质量和半径都与木星相当，但是其轨道周期极短 (小于 10 d)，公转轨道距离只有百分之几 AU，在太阳系中完全没有对应的行星。而且如此近距离的轨道会受到宿主恒星强烈的辐射，在高温下还能富集气体也挑战着先前的理论。理论模型预期，当行星轨道距离较远时，盘的公转速度较慢，盘内星子之间的相对速度也较慢，它们之间的碰撞过程更容易发生聚集。同时，在较远的距离，盘中环境温度低，星子的主要成分是冰，因此碰撞时有更大的粘附性。所以在较远距离的星子易在短时间内长成地球质量的天体。此外，在近距离轨道气体易受热挥发，当逃逸至远距离轨道冷却稳定后才容易被行星胚胎吸积，理论计算得出气态巨行星出现在更远距离的轨道上。

从吸积盘出发，我们期待盘面上的物质沿同一方向公转并与恒星自转方向相同，形成行星的公转方向也自然保持一致，但观测上发现了逆行的系外行星[32]，以及高轨道倾角的行星，如 HAT-P-7 b 公转面与宿主恒星赤道面的夹角可达到 86°[33]。

根据轨道的潮汐耗散理论，行星绕宿主恒星公转时会通过潮汐作用耗散轨道能量和偏心率，且行星质量和轨道偏心率越高、行星半径越大的行星会以更高的耗散率损失偏心率，即轨道圆化[34, 35]。但是观测上发现了一些违背潮汐耗散理论的例子，如 HD80606 b。HD80606 b 是一颗质量为 3.94 M_J，半径为 0.921 4 R_J 的行星，轨道半长轴为 0.449 AU，但它的轨道偏心率出奇地高，达到了 0.93。其宿主恒星的质量为 0.98 $M_\odot$，年龄为 7.63 Ga，相比之下，行星的质量已非常大，经历数十亿年的演化后，还能拥有如此高的轨道偏心率，并不符合潮汐圆化理论对大质量行星轨道偏心率随时间推移而减小，最终应有近似正圆轨道的预期。

太阳系内行星的密度通常在 1~5 $g \cdot cm^{-3}$，最极端的土星也有 0.7 $g \cdot cm^{-3}$。而在系外行星中发现了一批密度极低的行星，因其低密度的特性被称为“超级泡芙”。最极端的例子为 Kepler-51 b 和 Kepler-51 c，质量为 4.4 $M_\oplus$ 和 5.7 $M_\oplus$，半径高达 8.98 $R_\oplus$ 和 9.46 $R_\oplus$，对应的密度只有 0.03 $g \cdot cm^{-3}$ 和 0.04 $g \cdot cm^{-3}$，远远低于在太阳系中所见的天体。热木星因为平衡温度高而膨胀，但温度显著降低的“超级泡芙”就不能用受热膨胀来解释。目前的观点主要有：“超级泡芙”可能是由于系统年轻，还处于坍缩过程中，密度未达到稳定值；其

他的解释还有尘埃外流[36]，光化学烟雾[37]，潮汐加热引起膨胀[38]，或本身确实拥有特别厚的大气[39]；近期又有理论提出“超级泡芙”可能是一颗有环的行星，环的存在提高了行星的凌星深度，导致我们得出过大的半径[40]。由于目前观测数据的匮乏，各种解释都有一定的可能，尚无定论。

3.3 地外生命的遥遥无期

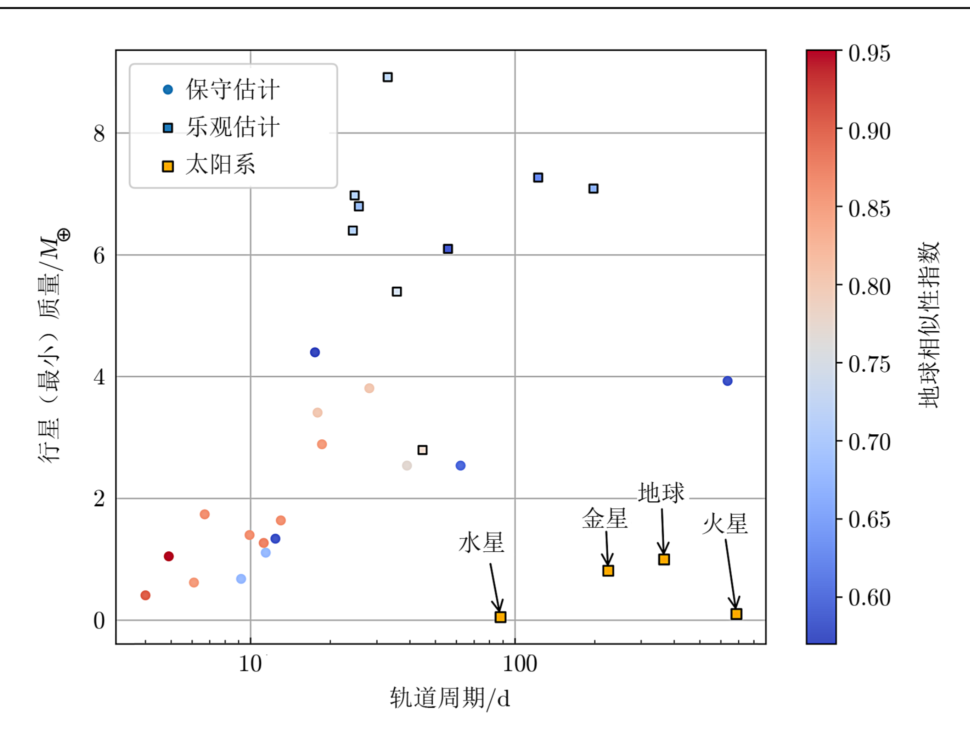
人类本能地会思考我们在宇宙中的地位，是否有其他智慧生物，地球是不是唯一一颗有生命存在的行星。地外生命是目前行星科学中最火热的方向，“我们是孤独的吗？”是长久以来的问题，天文学家为之做出了长久努力。早在 1896 年，Nikola 提出他的无线电传输系统的极端版本可以与火星上的生物通讯[41]；1960 年康奈尔大学的射电天文学家 Frank 第一次运用无线电方法对地外生命进行搜寻，该项目起名为 Ozma 计划。利用 26 m 口径的射电望远镜，在 1.420 GHz 波段观测了恒星 Tau Ceti 和 Epsilon Eridani，但是没有检测出有价值的信号①；最著名的通过无线电方法搜寻地外生命的项目是 SETI 计划，其中 SETI@home 部分为公众所熟知，利用公众志愿者计算机闲时的计算资源来对可能存在地外生命信号的观测数据进行数据分析，但目前还没有分析出可靠的地外生命信号。2020 年 3 月 31 日，该项目停止向用户发送新任务，工作陷入无限期的中断。SETI 小组表示，将为公众提供新的方式为 SETI 做出贡献。

根据目前人类对生命的理解，提出了宜居带的概念，即在恒星周围，适宜生命居住的范围。宜居带是通过水能以液态存在的范围来确定，基本思想是恒星通过黑体辐射 $F_*(T_*)$ 向外辐射能量，位于轨道 r 处的行星接受到 $F_{p+}[r, F_*(T_*)]$ 的辐射能流，而行星被加热后也会自发向外辐射能流 $F_{p-}(T_p)$，当 $F_{p+}=F_{p-}(T_p)$ 两辐射数值相等时，行星达到平衡温度 T_{pb}，平衡温度等于 0°C 和 100°C 时所对应的轨道位置 d_0 和 d_{100} 即对应宜居带的外边界和内边界。1993 年，Jim Kasting 等人用一维气候模型来估计主序星宜居带的范围，他们定义宜居带内边界为水将被阳光分解为 H_2 和 O_2 的临界位置，外边界为即使在温室气体浓度达到最高时，也不能保持足够高的温度维持水以液态形式存在的临界点，得到太阳系的宜居带范围为 0.95~1.67 AU[42]。到了 2003 年，Kasting 等人[43]改进了用于估计宜居带范围的一维气候模型，对水蒸气、CO_2 对能量的吸收量，水蒸气对光的散射等因素进行了更精确的计算，将宜居带范围调整到 0.99~1.70 AU 之间。上述对宜居带范围的计算都采用一维气候模型，Kasting 等人[44]使用更可靠的三维模型重新估计宜居带后，将太阳系宜居带的内边界重新调整到 0.95 AU。

波多黎各大学的行星宜居性实验室 (PHL)②为此做出了诸多努力，其提供的潜在的宜居行星列表 (HEC) 已经包含了 60 颗行星 (截止 2020 年 12 月，见图 1)，行星的质量集中在 $0.5M_\oplus \sim 10M_\oplus$之间，轨道周期通常短于 100 d，尚未覆盖太阳系中类地行星的位置。HEC 选择的宜居行星需要满足以下条件：(1) 宿主恒星的光谱型为 F, G, K, M 型；(2) 行星轨道处于 Kopparapu 等人[45]给出的宜居带内，且经过 Méndez 和 Rivera-Valentín[46]的轨道偏心

①https://time.com/time/magazine/article/0,9171,874057,00.html

②http://phl.upr.edu/home



注：数据源于行星宜居性实验室 (PHL)。

图 1　潜在的宜居行星轨道周期与质量关系

率矫正；(3) 行星半径处于 $0.5R_\oplus \sim 2.5R_\oplus$ 或最小质量处于 $0.1M_\oplus \sim 10M_\oplus$ 之间。PHL提供了潜在的宜居行星清单，这些潜在的宜居行星分为保守的和乐观的两个样本。保守样本要求行星半径小于 $1.5R_\oplus$ 或最小质量小于 $5M_\oplus$，很可能为宜居行星；乐观样本中对行星半径的约束扩展到了 $1.5R_\oplus \sim 2.5R_\oplus$，或质量处于 $5M_\oplus \sim 10M_\oplus$ 之间，与保守样本相比，乐观样本中的行星具有宜居性的可能性较低。此外地球相似性指数 (ESI) 适用于在相近半径、质量的行星中挑选最相似地球的行星，样本中的行星均要求 ESI 高于 0.5，ESI 表达式为：

$$ESI(S,R) = 1 - \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{S - S_\oplus}{S + S_\oplus}\right)^2 + \left(\frac{R - R_\oplus}{R + R_\oplus}\right)^2\right]} \ ,$$

其中，S, R 为行星接收到宿主恒星辐射的能流和行星半径，$S_\oplus$, $R_\oplus$ 为地球接收到的太阳辐射能流与地球半径。

尽管前人进行了诸多努力，但目前我们仍无法断定哪颗行星上存在地外生命。我们须对生命存在的形式、条件、将呈现的信号以及行星本身的演化历程进行深入研究，并且随着观测技术的进步，我们将以更直接的方式获取系外行星的参数。

4 大样本：系外行星

正如前文所述，目前的行星形成理论是不完善的，且基于一个行星系统所建立的理论，其普适性也有待检验，而系外行星就是我们寻求新突破的途径。其有助于我们回答太阳系是否是一个特殊的系统，其他行星系统是否也按照太阳系行星理论演化等问题，可以有效检验或约束普适的行星形成理论。为寻求一个完善而普适的理论，最近二十多年，天文学家不断搜寻、观测系外行星，为深化理论研究积累了大量系外行星的样本。

4.1 搜寻结果

截止 2020 年 12 月，NASA Exoplanet Archive① 上经认证的系外行星已有 4 307 颗，其中 3 275 (76%) 颗通过凌星法发现，821 (19%) 颗由视向速度法探测发现，一共有 3 300 颗行星测得了半径数据，而质量数据涵盖了 998 颗行星，另有 833 颗行星拥有最小质量数据。由系外行星发现时间统计可以看出每年的发现数目逐步增加 (见图 2a))，而发现的质量上限基本稳定在 $10^4 M_{\oplus}$ 附近 (这与 NASA Exoplanet Archive 系外行星被纳入档案的标准相关②，准则要求入选天体的质量或最小质量小于或等于 30 $M_{\rm J}$，对应 $10^4 M_{\oplus}$)，所探测行星的质量下限也逐步下探，从 1995 年的 $264 M_{\oplus}$ (55 Cnc b) 下探到 2015 年前后的 $0.06 M_{\oplus}$ (Kepler-138 b)，已经发现了少量与水星质量相当的系外行星 (见图 2c))。

在行星 (最小) 质量-轨道周期图中可以看出 (见图 2b))，这些行星在轨道周期和质量上与太阳系行星存在显著差异，存在大量短周期且大质量行星，极端的公转周期只有数小时，少有类似太阳系的长周期行星，这一现象可能是由系外行星搜寻选择效应引入所导致，目前最主流的探测方法为凌星法和视向速度法。凌星法的原理是行星遮挡了一部分宿主恒星的光，观测者发现恒星的亮度短暂变暗后恢复，以及光变存在固定的周期，且要求光变曲线满足特定的形状。凌星法需要发生多次凌星才能认证行星的存在，而两次凌星之间的时间间隔正好对应行星的轨道周期，因此凌星法强烈倾向于短周期轨道的大尺寸行星。行星绕宿主恒星公转时，其实是两者以公共质心为圆心 (焦点) 绕转，宿主恒星绕转时，以观测者来看恒星的光会存在多普勒效应，通过多普勒效应可以搜寻系外行星。当恒星朝向观测者运动时，谱线蓝移，远离时发生红移，频移量与恒星相对于观测者的视向速度大小相关，满足 $f_0 - f' = 1 - \sqrt{\dfrac{c+v}{c-v}}$，$c$ 为光速，v 为视向速度，而视向速度 v 的振幅满足[47] $K = \dfrac{28.43\mathrm{m\cdot s^{-1}}}{\sqrt{1-e^2}} \dfrac{M_{\rm p}\sin i}{M_{\rm J}} \dfrac{M_* + M_{\rm p}}{M_{\odot}}^{\frac{2}{3}} P^{-\frac{1}{3}}$，可见在短周期高偏心率轨道上，大质量行星的视向速度振幅大，更容易被探测到。短周期行星有着更高的被探测率，以及 Kepler 空间望远镜观测时长不过 9 a，难以认证更长周期的行星，导致探测结果强烈倾向于短周期行星。在图 2b) 中可见，相较于视向速度法，凌星法搜寻到的系外行星更集中于短周期轨道，视向速度法在较长周期轨道探测到了凌星法难以搜寻的行星。系外行星集中的区域呈现出 3 个聚集团簇，由于目前的观测对于短周期行星较完备，因此团簇之间出现的分布低谷应客观存

①https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

②exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/exoplanet_criteria.html

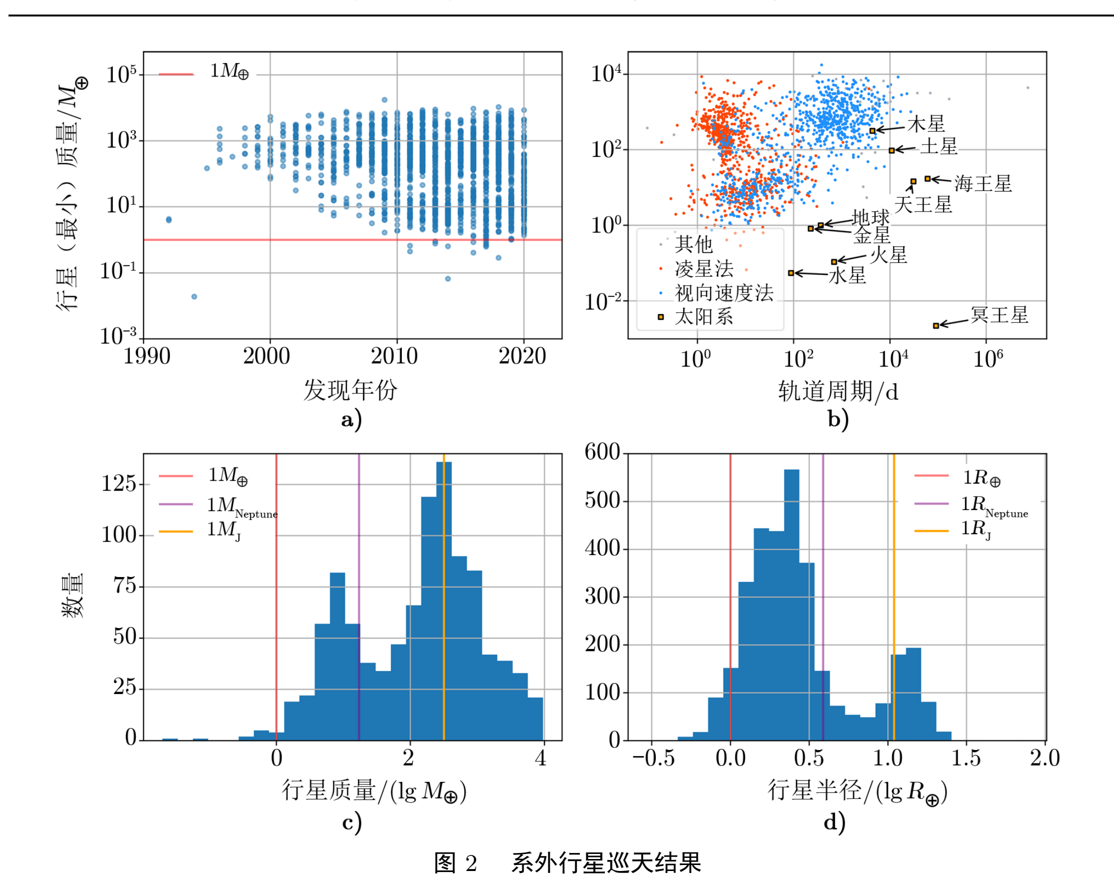


图 2　系外行星巡天结果

在，该结果也被 NGPPS[48] 等模型印证。轨道周期反映离宿主恒星的距离，可以用于表征行星的温度，因此目前习惯上将左上角的团簇称为“热木星”，左下角的称为“热海王星”或“热超级地球”，右上角的则为“冰巨星”。从行星形成及演化理论上看，这三类行星之间的区别应当对应不同的物理过程，可以成为研究行星形成及演化机制的突破口。

目前所认证的行星在质量 (半径) 上可以明显地区分为两类，主要集中在地球与海王星质量 (半径) 之间和木星质量 (半径) 附近(见图 2c), 2d))。行星质量或质量下限通过视向速度法测量，而行星半径通过凌星法测量，两方法的选择效应不能完整匹配，因此在直方图上的两个峰值高度也不能匹配，但可以肯定在质量或半径上确实存在两类天体。根据核吸积模型，行星是由微米尺度的尘埃颗粒吸附聚集而后吸积气体形成，是一个由小变大的过程，微小的行星更能反映行星形成初期的性质。我们也期待在未来更完备的系外行星搜寻中发现更小的天体聚类，从而对形成初期的行星，以及行星形成的早期过程有更深入的理解。

5　行星分类

5.1　行星分类背景

分类对于深刻认知天体来说十分重要，目前天文学界对于恒星、星系都构建出了全面、

可靠的分类体系，如恒星的赫罗图、星系的哈勃音叉，赫罗图与哈勃音叉在恒星物理与星系天文学中有着举足轻重的作用，以简单的图反映天体一生的演化过程，便于对形成和演化理论的理解与传播。一个完善的分类体系应该能完整地反映天体的形成和演化理论，在分类体系中呈现出天体形成和演化各个阶段的特点与性质，便于对理论的图形化表述，预测新类型的天体，反向促进理论模型的发展。而对于行星来说，目前已发现了 4 000 多颗系外行星，通过系外行星性质的分类统计分析，期望能发现更多未知的行星，促进理论的发展，然而目前尚无一个完善的分类体系来描述行星形成理论。长久以来我们对行星的认知都局限于对太阳系的观测，根据 8 大行星成分或大小的特征区分出类地行星和类木行星，根据轨道的距离将水星、金星、地球、火星分为内行星，木星、土星、天王星、海王星为外行星。甚至连行星的定义也是到了 2006 年国际天文学联合会通过决议①才确定下来，但此次决议也充满争议。最新的系外行星定义是 2018 年由 IAU 基于对太阳系行星的定义拓展而来②，增加了最大质量上限 ($M_{\rm p} \leqslant 13M_{\rm J}$)，要求行星围绕着恒星量级的天体公转，且质量比低于 L4/L5 的不稳定性条件 ($M/M_{\rm planet} \leqslant 1/25$)。至于更高一层次的行星分类系统更是遥遥无期，至今尚无公认的分类体系，甚至更多是存在于科幻作品中的分类方法。

5.2 行星分类进展

目前对全体行星的分类工作有：

(1) 单一参数分类

1) 对行星进行分类最容易想到的就是通过质量来区分各类行星。在质量分类方面，Michael③ 从 1.90×10^{24} kg 到 1.90×10^{30} kg，每一个数量级都分为一类行星。

2) Meghar④ 的分类方法也类似，从 0.000 005 到 50 000 $M_\oplus$ 每个数量级分为一类行星。

3) 不同物质会在密度上出现显著区别，气态行星和岩石行星即是如此。Fischer 等人[49]通过考虑成分为纯氢-氦、纯水、纯硅酸盐、纯铁的行星，各自密度受自身引力压缩的质量-密度关系，对探测到的系外行星进行了划分，如图 3 所示。

4) Chen 和 Kipping[50]对行星的质量-半径关系进行了分析，如图 4 所示，分别在 2.0 $M_\oplus$, 0.41 $M_{\rm J}$, 0.080 $M_\odot$ 处找到了对应密度关系的转折点，这些点分别对应开始形成挥发性包层、开始自身引力压缩、氢开始燃烧的物理过程。

5) 通过密度大小，直接将密度极低行星称为“超级泡芙”，判断准则为 $\rho \leqslant 0.3\,{\rm g\cdot cm^{-3}}$。

6) Marley 等人[51]对于系外巨行星大气光谱的研究中提出了按成分划分的分类方法，即氨云、水蒸气云、无云、一氧化碳和碱金属云、硅酸盐云，此顺序也与由远到近的轨道距离对应，即相应物质沸点的空间位置。

(2) 多参数分类

1) 2002 年，Stern 和 Levison 提出基于质量和成分的分类方法[52]。按质量分为亚矮行星

①https://www.iau.org ? archives ? releases ? doc ? iau0603

②https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F2/info/documents/

③http://rocketforge.org/2009/06/09/a-planetary-classification-proposal.html

④http://web.archive.org/web/20071002090026/cosmic.lifeform.org/?p=166

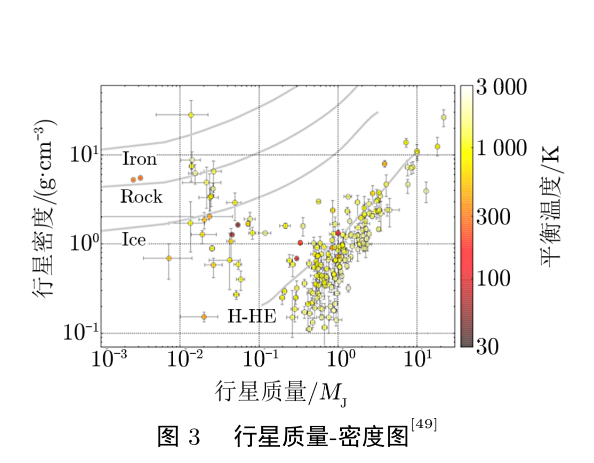


图 3 行星质量-密度图[49]

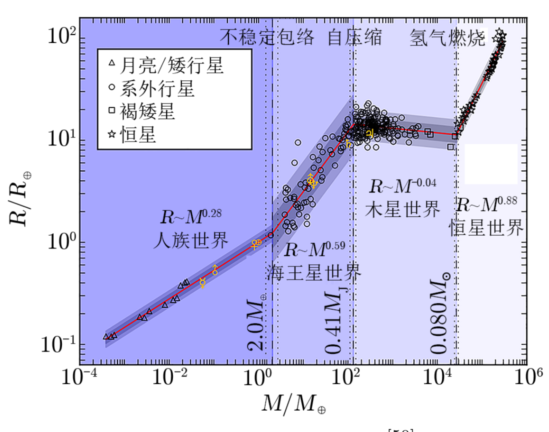


图 4 行星质量-半径图[50]

($< 0.03\ M_\oplus$)、矮行星 ($< 10\ M_\oplus$)、亚巨行星 ($< 10^2\ M_\oplus$)、巨行星 ($< 10^3\ M_\oplus$)、超级巨行星 ($< 10^{4.5}\ M_\oplus$)；按成分分为以岩石为主、以冰为主、以 H 为主三类。质量与成分组合决定行星最终的类型。同时他们也表明这样的分类方法是不完善的，并提出了构建分类框架应该满足的要求：

① 分类方法应该基于物理；

② 根据易于观测的特征决定类型，利于对全体样本进行分类，尽量削弱观测选择效应；

③ 天体的参量、特征用数值表示；

④ 每个天体有唯一确定的类型，不应出现在多个类型中；

⑤ 用于分类的特征应该恒定不变；

⑥ 对新的类型应该保持稳健性，为未知的空间保留余地 (如逃离宿主恒星的双行星、三行星)；

⑦ 分类准则应当尽量简洁，不繁复。

2) Russell[53]在文章中介绍的分类方法考虑了行星的组成成分、质量、轨道三方面性质。在组成成分方面考虑了金属、硅酸盐、水冰、大气的质量比，分为 19 类。又根据行星的质量分为 5 类，每一类分别对应着褐矮星质量、木星质量、海王星质量、地球质量、木卫三质量的天体。此外他还考虑了行星的轨道，分为典型行星 (地球)、带内行星 (矮行星)、卫星、流浪行星、典型双行星、带双行星、流浪双行星。三方面性质的相互组合，构成最终的分类。

3) 在 FANDOM①对行星分类的介绍中，对分类框架考虑了行星的质量、轨道、表面状态、组成成分。行星质量范围从 $0.01M_\oplus$ 到 $13M_J$，分为类地 (E)、类海王星 (N)、类木 (J) 三大类，每大类又有 a, b, c 三小类。将轨道距离从小于 0.1 AU 到大于 100 AU，按照类似等比数列的形式分为 12 类，即随着距离增大，类型区间也更大。对于星球表面的分类则是按

①https://planetstar.fandom.com/wiki/Planetary_classification

照人类对行星特征的想象划分为气态、熔岩、火山、荒漠、沙漠、山地、冰、海洋、森林、城市。最后是对组成成分的考虑，即分别为 H, He, Fe, C, H_2O, 硅酸盐等成分主导的行星。

(3) 宜居性分类

1) PHL 的宜居性分类，在是否宜居的基础上，还对宜居行星分为了亚地球尺寸、地球尺寸、超级地球尺寸类型。

2) Saha 等人[54]利用神经网络在系外行星宜居性分类的工作中将行星分为：不宜居、Mesoplanet、Psychroplanet 三类行星。其中 Mesoplanet 温度范围为 0°C∼ 50°C 的宜居行星，Psychroplanet 为 −50°C∼ 0°C 的行星，通常不宜居，但在特定条件下可以作为潜在的宜居行星。

3) Charles 和 Jose 认为，为寻找宜居的类地行星，需要对类地行星进行分类，关键元素 (C, O, Mg, Si, S 和放射性同位素) 丰度的微小变化，会严重影响宜居性①，提议：

① 从太阳的组成成分开始分析，确定形成类地行星的元素比例的消耗模式；

② 用恒星光谱巡天测量恒星元素的丰度范围，并与太阳进行比较；

③ 根据消耗模式 ① 和恒星元素丰度 ②，估算附近恒星周围的类地行星的化学成分；

④ 类地行星最主要的元素丰度会有区别，根据对化学成分的估计对类地行星分类；

⑤ 通过对地球的研究，在组成成分和宜居性之间建立更紧密的联系。

5.3 行星分类缺陷

现有的行星分类方法存在诸多缺陷，多数设定的数值判据十分随意，缺少具有物理内涵的数值边界，不能反映出各类行星之间物理上的本质区别，主要问题如下。

(1) 基于不同背景、不同用途所构建的分类系统都有其偏向，常常关注某个特定的主题，如是否宜居，是否为“超级泡芙”。对于其不关注的天体难以进行有效区分，不具有普适性。

(2) 分类参数过少，往往是针对某一项参数或某一特征的分类，而非对行星整体分类，我们需要找到一组可以完备描述所有行星的参数，基于这组参数进行分类。

(3) 各个分类系统普遍存在基于太阳系的问题，用太阳系的特征来描述所有行星系统并不恰当，因为太阳系是一个比较特殊的系统，并不能全面地呈现出行星这类天体的全貌。系外行星巡天的结果告诉我们，宇宙中有太多未知的天体，我们不知道行星系统还有其他哪些状态和模式，一共需要多少个参数才能完备描述各个行星系统，对系外行星进行更全面的观测十分必要。

(4) 现有的分类系统往往是直接对观测量分类，没有考虑行星形成与演化理论中所预期的过程。在行星的一生中，参数难以一成不变。各个类型之间除了平行关系外，也可能是演化序列的先后关系，即从类型 A 演化到下一个类型 B，A 是 B 的基础，B 是 A 的结果。若在图上作出各类天体的散点，同一类天体应聚集在同一区域；各类天体之间过渡带的散点密度也能反映出演化时标的长短，各类行星在图中的位置分布，也将反映各类行星的演化路径。

---

①https://www.mso.anu.edu.au/ charley/papers/LineweaverRobles2006.pdf

如果我们能构建出一个适用于全体行星的完善的分类体系，将有助于理解行星形成演化理论，也便于进行行星的讨论与知识的传播，促进理论的发展。

6 行星理论及分类的新窗口：原行星盘

为了构建全面的行星形成理论及行星分类体系，需要研究各个阶段的行星，包括从原行星盘中诞生阶段的行星，到老年恒星周围的年老行星，这些涵盖行星一生的样本有助于我们理解行星从诞生到死亡的整个过程。由于行星形成阶段时标远短于演化阶段，我们直接观测到的行星往往是形成的晚期形态，行星已达到稳定状态，而原行星盘就是我们窥探行星早期形成环境、形成过程的途径。原行星盘是恒星-行星系统形成过程中物质存在形式，最早是通过观测超出恒星黑体谱的过量红外辐射来感知原行星盘的存在，而如今随着综合孔径射电观测技术的成熟，角分辨率大幅提升，我们能够在射电波段对原行星盘直接进行形态学观测。对于原行星盘质量的测量分为对固体质量和气体质量的测量，固体质量测量通常是基于毫米波连续谱的光度，而气体质量测量则利用 CO 分子线，将来会倾向于用 HD 分子线。甚大天线阵 (VLA)、阿塔卡玛大型毫米/亚毫米阵列 (ALMA) 望远镜已经开展了原行星盘的巡天观测，获得了大量的观测资料，可用于对行星形成早期环境的研究。

6.1 VLA+ALMA: VANDAM 巡天

The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity Survey (VANDAM)，新生原行星盘及其复合性巡天[①]，观测科学目标是表征原恒星阶段复合性的频率，测定原恒星伴星的空间间隔距离分布，分辨原恒星周围的盘结构，测定尘埃辐射的光谱指数，在厘米波段测量原恒星喷流的辐射。观测分为英仙座巡天和猎户座巡天两部分。

英仙座巡天是用 VLA 对距离约 230 pc 处英仙座分子云中所有已知原恒星的射电多波段进行观测，涵盖了 8 mm, 1 cm, 4 cm, 6.4 cm 波段。观测以 A, B 两种阵列进行，A 阵列用于获得最高的图像分辨率，而 B 阵列是为了对致密的展源更灵敏，A, B 两阵列中最佳分辨率分别为 0.065″(15 AU) 和 0.2″(46 AU)。

猎户座巡天作为拓展项目，又加入了对猎户座分子云中原恒星的观测。用 ALMA 在 0.87 mm 波段对赫歇尔猎户座原恒星巡天 (HOPS) 中的 328 个原恒星观测了 9.1 h，包括连续谱、^{12}CO J=3-2 和 ^{13}CO J=3-2 线，对所有源有约 0.1″ 的分辨率。此外还使用 VLA 观测了 100 个最年轻的猎户座原恒星，在 A 和 C 阵列下观测了 350 h，在 8 mm 和 1 cm 波段分辨率约 0.08″。后续还将在 ALMA Cycle 6 中对 40 个多星系统进行观测。

6.2 ALMA: DSHARP 巡天

高角分辨率盘子结构项目 (Disk Substructures at High Angular Resolution Project, DSHARP[②])，是 ALMA 望远镜第 4 周期的大型观测项目。DSHARP 是对 20 个近邻、明亮

[①] https://www.cv.nrao.edu/ jtobin/VANDAM/index.html

[②] https://almascience.eso.org/almadata/lp/DSHARP/

的大型原行星盘，进行 240 GHz (1.25 mm) 连续谱以及 ^{12}CO J=2-1 发射线的深度射电观测，分辨率达到 0.035″，对应 5 AU 的空间分辨率。观测的科学目标是研究盘的普遍特性、位置、尺寸、小尺度子结构的波动，盘物质分布及其如何参与进行星形成的过程。

DSHARP发现原行星盘基本都为中心对称结构，在此基础上各行星盘都有各自的细微结构 (见图 5)，其中 15 个有明亮的环和黑暗的间隙，在原行星盘 IM Lup, Elias 27 和 WaOph 6 中出现了类似星系旋臂的结构，而且旋臂结构还会与环相互叠加，形成更复杂的形态。在多恒星系统，如 HT Lup 和 AS 205 中，呈现出明显的动力学相互作用迹象，如两条清晰的旋臂结构和复杂的 CO 分布[55]。

除了射电观测外，VLT/SPHERE, Gemini/GPI 和 Subaru/HiCIAO 等观测设备在近红外波段也观测到与射电观测类似的原行星盘细节特征。基于这些对原行星盘的观测，借助数值模拟的方法，可以引入特定质量的行星来重现观测到的原行星盘中的细节，如 Rosotti 等人[56]，Dong 和 Fung[57]，Hallam 和 Paardekooper[58] 等团队从原行星盘观测数据中，反演出产生原行星盘中环缝等特征的行星的质量，质量范围为 0.02 $M_{\rm J}$ ~10 $M_{\rm J}$，这些反演出来的行星数据可以作为早期行星的参数，与实际探测到的系外行星互补，为行星早期形成理论研究提供更多参考与约束。

7 未来观测与总结

7.1 新一代望远镜

由于观测设备性能与地基观测的局限，目前对行星这类天体的观测是不完善的，观测得到的参数往往局限于质量、半径、轨道参数等概要性的描述参量，未能获得行星的全部信息，难以从这些物理量真正区分各类行星，即便做出区分也难以进行更可靠的认证，更无从构建完善的行星分类体系，行星形成演化理论的进一步发展也受到限制。已用于系外行星观测的空间望远镜 Kepler 和 TESS 都是通过凌星法探测，探测目的也仅仅是为了搜寻系外行星这类天体，也没有更深层次的观测能力，因此亟需新一代观测设备深化我们对行星的认知。新一代单镜面射电望远镜可以提升我们对地外文明信号的搜寻，射电望远镜阵列以其极高的角分辨率可以对原行星盘进行更细致的观测，搜寻还处于形成初期的系外行星，下一代空间望远镜的设计已考虑进行系外行星的冕星光谱观测，期待以更全面的维度来认知行星。

7.1.1 FAST

位于贵州平塘的 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST) 是当今世界口径最大的望远镜，巨大的接收面积使其拥有极高的灵敏度，可以用于搜寻系外行星以及对地外文明信号的搜寻。太阳系包含 6 颗磁化了的行星 (水星、地球、木星、土星、天王星、海王星)，拥有行星尺度的磁场。在它们的磁层中，多种机制加速电子到 KeV 至 MeV 量级，在高纬度产生射电辐射。辐射频率依赖于局域的回旋频率，正比于磁场强度，往往低于数十 MHz。受星系背景噪声的干扰，在分米波长下，只能分辨出0.2 pc距离内木星量级的射电辐射。但对恒星风与行星磁层相互作用的研究表明，

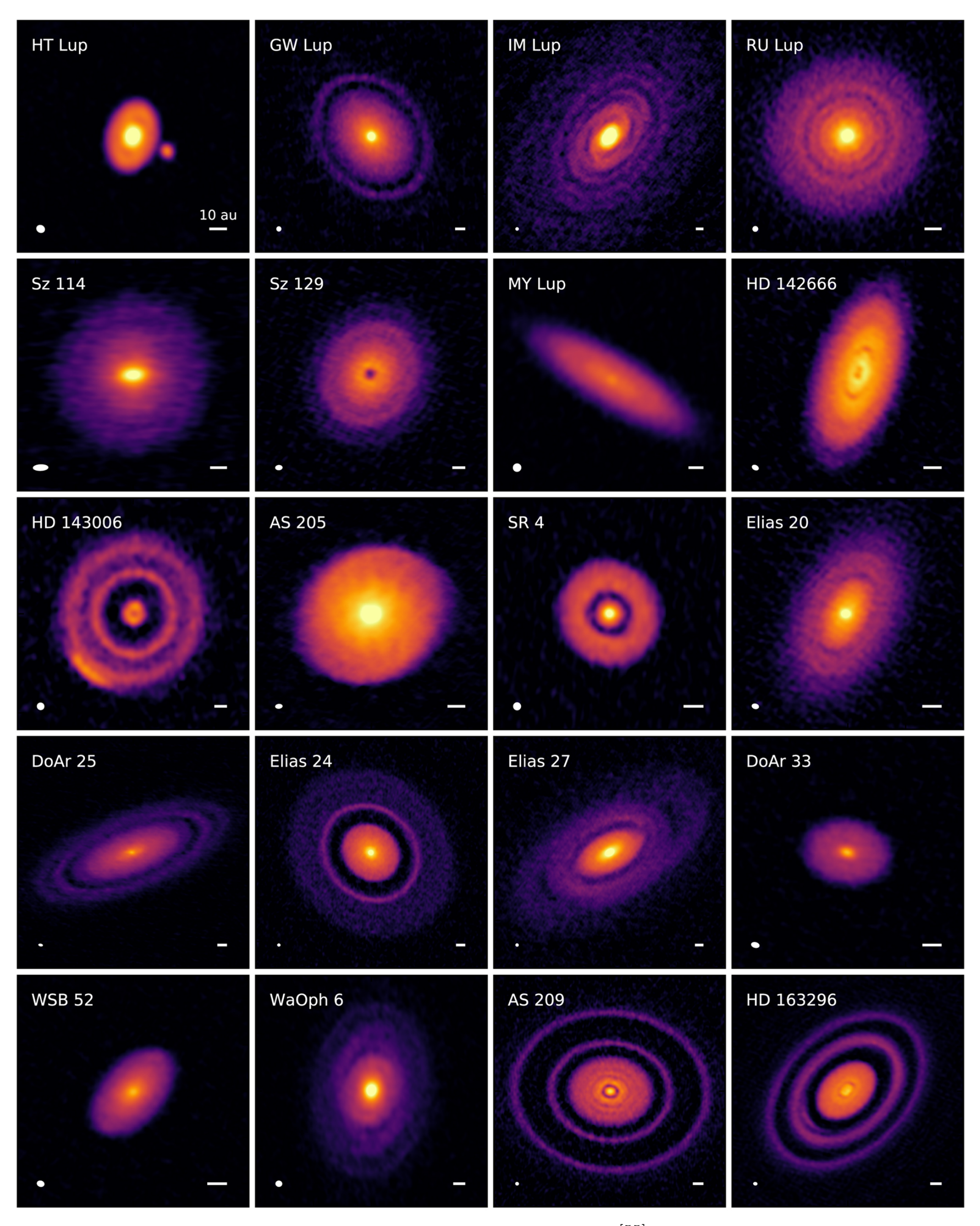


图 5 DSHARP 观测结果[55]

热木星的射电辐射可以达到木星的 $10^3 \sim 10^5$ 倍，从而扩大系外行星的搜寻范围。尽管在射电波段的成像可能无法直接分辨出恒星-行星系统，但是可以从射电辐射的极化、周期性来区分来自恒星和行星的信号，从而探测行星的存在[59]。此外，FAST 的科学目标中包含脉冲星巡天，可以通过脉冲星周期的扰动即脉冲星计时法，搜寻脉冲星附近的系外行星①。

7.1.2 CSST

中国空间站望远镜 (Chinese Space Station Telescope, CSST) 服务于中国空间站光学巡天项目②。望远镜口径 2 m，将进行光学成像和棱镜光谱观测，覆盖近紫外到近红外波段 (255∼1 000 nm)，计划于 2024 年前后发射升空，采用约 400 km 的地球轨道，伴飞中国空间站，预计寿命 10 年。CSST 携带冷行星成像星冕仪 (cool planet imaging coronagraph, CPIC)，可对恒星-行星系统中远轨道行星直接成像观测，对比度达到10^{-9}。与地面通过凌星法、视向速度法易探测的热行星互补，CPIC 将为我们构建更完备的系外行星样本，且采用更为直接的观测方法，可以获取系外行星更丰富、更重要的信息 (如颜色、成分)，也符合未来空间天文发展的趋势。

7.1.3 SKA

平方公里阵列 (Square Kilometre Array, SKA)③是在南非和澳大利亚建造中的大型射电望远镜阵列，因其总接收面积将达 1 km^2 而得名，预计于 2027 年以后能开始科学观测。中国作为 SKA 的创始国和正式成员国之一，参与了天线、低频孔径阵列、中频孔径阵列、信号与数据传输、科学数据处理、宽带单像素馈源等 6 个国际工作包联盟的研发工作④。在 SKA 的第一阶段，可以在 2 cm 波段附近，对最近邻系统进行空间分辨率达 4 AU 的观测，因此可以探测雪线附近厘米尺度粒子的分布。我们可以利用该波段深入探寻生命起源相关的分子，如氨基酸。与 FAST 类似，SKA 可以利用低频观测研究源自系外行星的磁场，从行星极光的射电辐射中洞察其内部信息，也可用于系外行星卫星的搜寻。人类希望知道生命能否存在于其他行星系统，更渴望了解地外生命能否进化成智慧生命，自从 SKA 立项，SETI 就是其核心科学的一部分，也因 SKA 有巨大的接收面积和极高的灵敏度，SETI 理应成为其核心科学目标，探测地外生命活动时产生的无线电信号[60]。

7.1.4 JWST

詹姆斯 • 韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST)⑤是一台 6.5 m 口径望远镜，作为哈勃空间望远镜 (HST) 的继任者，已于2021年12月25日在法属圭亚那航天中心升空，发射至日地 L2 点。虽说是 HST 的继任者，但观测波段与之不同，JWST 其实是一台红外望远镜，观测波长涵盖 0.6∼30 μm。由于分子谱线在红外波段有丰富的特征，红外望远镜对于系外行星观测意义非凡。关于系外行星的科学目标就包括恒星、原行星系统的诞

①https://fast.bao.ac.cn/

②http://lss.bao.ac.cn/meeting/css-os2017/CSS-OS20190816.pdf

③https://www.skatelescope.org/

④https://china.skatelescope.org/

⑤https://www.jwst.nasa.gov/

生，行星系统和生命的起源。

7.1.5 PLATO

柏拉图望远镜 (PLAnetary Transits and Oscillations of stars, PLATO)[①]由欧空局研发，计划于 2026 年发射至日地 L2 点。PLATO 通过监测恒星光变来探测系外行星，主要目标是搜寻超过 100 万颗恒星的凌星事件，搜寻并确认系外黄矮星、亚巨星、红矮星周围的岩石行星。为了寻找液态水，任务的重点是搜寻类太阳恒星宜居带中地球尺度的行星。PLATO 一共携带 26 台相机，其中 24 台为“普通”相机，另外两台为“快速”相机，每台相机由 4 块 CCD 拼接而成。普通相机通过 25 s 的长曝光监测暗于 8 mag 的星，快速相机则用 2.5 s 的短曝光监测 4~8 mag 的亮星。普通相机将分为四组望远镜，每组由 6 个口径 120 mm 的镜头组成，合成总视场将达到约 2 232 平方度。

7.2 未来大型空间项目

美国宇航局为未来的大型战略科学任务提出了四项大型空间任务，即：宜居系外行星天文台，大型紫外、光学、红外巡天仪，起源太空望远镜，Lynx X 射线天文台，其中与系外行星紧密联系的是前三个项目。这些项目已于 2019 年提交给了美国宇航局和美国国家科学院，将由其独立的十年规划委员会审核项目的优先级，优先级最高的将得以实施并获得资金支持，预计于 2035－2040 年之间发射至日地 L2 点。

7.2.1 HabEx

宜居系外行星天文台 (habitable exoplanet observatory, HabEx)[②]，是一台口径 4 m 的偏轴望远镜，设计寿命为 5~10 a。设计最大特点在于利用直径 52 m，放于望远镜前方 76 600 km 处的折叠星冕板遮挡恒星的光，以便观测恒星附近暗弱的行星。科学目标包括寻找邻近的行星以及探测其宜居性；探测邻近的行星系统，了解其组成行星的多样性；通过扩展到紫外、近红外波段的观测，从而能对从太阳系到星系和宇宙尺度的天体物理系统进行新的探索。

7.2.2 LUVOIR

大型紫外、光学、红外巡天仪 (large UV/optical/infraRed surveyor, LUVOIR)[③]，波段覆盖 100~2 500 nm，结构与 JWST 类似，有 A, B 两个设计方案，口径分别为 15 m 和 8 m，分别采用主轴和偏轴设计。初期任务期限为 5 a，携带供 10 a 使用的消耗品，组件设定寿命为 25 a。在科学目标上，包括测定大量系外行星的大气成分，测量凌星行星的大气逃逸率；研究原行星盘中 C, H, O 分子载体的演化，追踪行星盘风；观测行星形成晚期星子的空间分布；统计晚龄主序星的行星系统结构；对于太阳系内的研究，可以测定太阳系外侧小天体的尺寸、颜色、轨道。

[①]https://sci.esa.int/web/plato/

[②]https://www.jpl.nasa.gov/habex/

[③]https://www.luvoirtelescope.org/

7.2.3 OST

起源空间望远镜 (Origins Space Telescope, OST)[①]口径 5.9 m，覆盖波段 2.8~588 μm，可有效衔接 JWST 与 ALMA 的观测波段。科学目标包含了恒星与金属如何在星系中形成，星系中心的超大质量黑洞如何长大，行星演化过程中宜居性条件是如何演变，围绕着 M 型矮星公转的行星能否维持生命的存在。

7.3 总 结

行星作为一类熟悉而陌生的天体，人类已经进行了数百年的研究，为太阳系行星建立了诸多模型。现在引力不稳定性模型难以解释低密度盘中近轨道、小质量行星的形成，在对原行星盘观测中也尚未发现支持引力不稳定性模型的团块状结构。而对于目前广泛接受的核吸积模型，尽管原行星盘观测到的细节支持了行星通过在盘中吸积物质逐渐长大的观点，但在理论与实验中，星子逐渐长大过程中存在的诸多问题还尚未找到可靠的解决方法，仍有诸多不完善的细节。理论模型仍有各自的应用局限性和缺陷，行星分类体系更是尚无可靠进展，我们渴望一个普适而统一的行星形成演化理论模型和分类体系来描绘行星形成和演化，引领我们认识这类天体以及理解我们生命本身。

系外行星的成功探测为我们研究行星这类天体开启了全新窗口，TESS 卫星接替了已退役的 Kepler 卫星，我们还在源源不断发现新的系外行星。全新的下一代设备为观测能力带来革命性的飞跃，我们将能从各个波段深入研究系外行星的多样性、复合性，为理论模型的修改或彻底重建提供线索和基础。在进一步完善或颠覆引力不稳定性与核吸积等理论模型的基础上，我们也期待行星分类体系有更高层次的发展，以图表形式将行星理论模型清晰、透彻地呈现，为发现全新类型的行星做出可靠预测，拼出行星全部特征、性质的拼图，便于我们深入了解行星，表达出生命诞生、演化、存续的条件，加深对生命的理解。

致谢

此研究使用了美国宇航局系外行星档案 DOI 10.26133/NEA1，该档案由加州理工学院与美国宇航局系外行星探索项目协议下运营。

参考文献：

[1] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378(6555): 355
[2] Williams I P, Cremin A W. QJRAS, 1968, 9: 40
[3] Swedenborg E. Latin: Opera Philosophica et Mineralia (English: Philosophical and Mineralogical Works). Principia, 1973: 1
[4] See T J J. Proceedings of the American Philosophical Society, 1909, 48(191): 119
[5] Lankford J, Rothenberg M. History of Astronomy: An Encyclopedia. New York: Garland Pub., 1997
[6] Jeans J H. The Observatory, 1917, 40: 196
[7] Russell H N. The solar system and its origin. New York: The Macmillan company, 1935

[①]https://asd.gsfc.nasa.gov/firs/

[8] Spitzer L Jr. ApJ, 1939, 90: 675
[9] Jeans J. The British Journal of Radiology, 1931, 4(43): 351
[10] Kuiper G P. Proceedings of the National Academy of Science, 1951, 37(1): 1
[11] Cameron A G W. Moon and Planets, 1978, 18(1): 5
[12] Safronov V S. Annales d'Astrophysique, 1960, 23: 979
[13] Toomre A. ApJ, 1964, 139: 1217
[14] Safronov V. Evolution of Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets, Nauka, Moscow. Washington: NASA Tech. Transl, 1969
[15] Goldreich P, Ward W R. ApJ, 1973, 183: 1051
[16] Hillenbrand L A. arXiv e-prints, 2005: astro–ph/0511083
[17] Hernández J, Hartmann L, Calvet N, et al. ApJ, 2008, 686(2): 1195
[18] Hartmann W K, Phillips R J, Taylor G J. Origin of the moon. Houston: The Lunar and Planetary Institute, 1986
[19] Urey H C. Mrs. Hepsa Ely Silliman Memorial Lectures, 1952
[20] Benz W, Slattery W L, Cameron A G W. ICARUS, 1988, 74(3): 516
[21] Gold T, Soter S. ICARUS, 1969, 11(3): 356
[22] Lago B, Cazenave A. Moon and Planets, 1979, 21(2): 127
[23] Shen M, Zhang C Z. Earth Moon and Planets, 1988, 43(3): 275
[24] Dones L, Tremaine S. Science, 1993, 259(5093): 350
[25] Mordasini C, Alibert Y, Benz W. A&A, 2009, 501(3): 1139
[26] Mordasini C, Alibert Y, Benz W, et al. A&A, 2009, 501(3): 1161
[27] Emsenhuber A, Mordasini C, Burn R, et al. arXiv e-prints, 2020: arXiv:2007.05561
[28] Chiang E, Youdin A N. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, 38: 493
[29] Haghighipour N. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2013, 41: 469
[30] Pollack J B, Consolmagno G. Origin and evolution of the Saturn system. California: NASA, 1984
[31] Desch S J, Ciesla F J, Hood L L, et al. In: Krot A N, Scott E R D, Reipurth B, eds. Chondrites and the Protoplanetary Disk. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005，341: 849
[32] Cameron A, et al. Royal Astronomical Society Press Release, 2010, 10: 25
[33] Winn J N, Johnson J A, Albrecht S, et al. ApJ, 2009, 703(2): L99
[34] Goldreich P. MNRAS, 1963, 126: 257
[35] Peale S J. ARA&A, 1999, 37: 533
[36] Wang L, Dai F. ApJ, 2019, 873(1): L1
[37] Kawashima Y, Hu R, Ikoma M. ApJ, 2019, 876(1): L5
[38] Millholland S. ApJ, 2019, 886(1): 72
[39] Lee E J, Chiang E. ApJ, 2016, 817(2): 90
[40] Piro A L, Vissapragada S. AJ, 2020, 159(4): 131
[41] Carlson. Isis, 1999, 90(1): 138
[42] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. ICARUS, 1993, 101(1): 108
[43] Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F, et al. ApJ, 2013, 765(2): 131
[44] Kasting J F, Harman C E. Nature, 2013, 504(7479): 221
[45] Kopparapu R K, Ramirez R M, SchottelKotte J, et al. ApJ, 2014, 787(2): L29
[46] Méndez A, Rivera-Valentín E G. ApJ, 2017, 837(1): L1
[47] Lovis C, Fischer D, et al. Radial velocity techniques for exoplanets. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2010
[48] Emsenhuber A, Mordasini C, Burn R, et al. arXiv e-prints, 2020: arXiv:2007.05562
[49] Fischer D A, Howard A W, Laughlin G P, et al. In: Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al, eds. Protostars and Planets VI. Tucson: University of Arizona Press, 2014: 715
[50] Chen J, Kipping D. ApJ, 2017, 834(1): 17
[51] Marley M S, Gelino C, Stephens D, et al. ApJ, 1999, 513(2): 879

[52] Stern S A, Levison H F. Highlights of Astronomy, 2002, 12: 205
[53] Russell D. arXiv e-prints, 2013: arXiv:1308.0616
[54] Saha S, Nagaraj N, Mathur A, et al. European Physical Journal Special Topics, 2020, 229(16): 2629
[55] Andrews S M, Huang J, Pérez L M, et al. ApJ, 2018, 869(2): L41
[56] Rosotti G P, Juhasz A, Booth R A, et al. MNRAS, 2016, 459(3): 2790
[57] Dong R, Fung J. ApJ, 2017, 835(2): 146
[58] Hallam P D, Paardekooper S J. MNRAS, 2020, 491(4): 5759
[59] Zarka P, Li D, Grießmeier J M, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(2): 023
[60] Hoare M, Perez L, Bourke T, et al. Proceedings of Science. Giardini Naxos, Italy: SISSA, 2015: 9

Theoretical Model of Planet Formation and Classification of Planets

JIANG Xiao-ming[1], ZHU Zhong-hong[1], HE Ruogu[3]

(1. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill University, Montreal, Quebec H3A 0B9, Canada)

Abstract: Classification is a commonly used method in astronomy, which has been widely used in the research of stars and galaxies, but currently there is no complete classification system in the planetary field. This paper reviews the construction process of the theoretical model of planet formation and its shortcomings; Summarizes the search results of exoplanets and their parameter distribution characteristics; Introduces the current research background, progress and limitations in planet classification; In order to cover more exoplanet populations, it is proposed to combine radio observations on the protoplanetary disks, and expand the sample of theoretical research and classification framework; Finally, the paper describes the observation capabilities and scientific goals of the latest generation and planning large observation equipment in terms of exoplanets.

Key words: planetary theory; exoplanet; classification